



doi: 10.18720/CUBS.66.6

Модель перемещений гребня плотины водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС

Model displacements of the dam crest reservoir Sayano-Shushenskaya HPP

С.Е. Беднарук¹, В.В. Чуканов², Е.М. Кленов³,
Д.В. Козлов^{4*}

¹⁻³Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, Москва, Тимирязевская ул., 49

⁴Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

S.E. Bednaruk¹, V.V. Chukanov², E.M. Klenov³,
D.V. Kozlov^{4*}

¹⁻³Russian state agrarian University – MTAA named after K. A. Timiryazev, 49, Timiryazevskaya st., Moscow, 127550

⁴National Research Moscow State Civil Engineering University, 26 Yaroslavskoye av., Moscow, 129337 Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Саяно-Шушенская ГЭС;
радиальное перемещение гребня;
напор и изменение напора;
критерии безопасности;
водохранилище;
диспетчерский график;

KEYWORDS

Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant;
concrete dam crest radial displacement;
reservoir head and reservoir head increment;
reservoir;
operation schedules;

ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 02.04.2018

Принята: 22.05.2018

ARTICLE HISTORY

Submitted: 02.04.2018

Accepted: 22.05.2018

АННОТАЦИЯ

После аварии в 2009 году оценка эксплуатационной надежности ответственных бетонных сооружений таких, как плотина Саяно-Шушенской ГЭС, актуальна и в первую очередь основывается на исследованиях напряженно-деформированного состояния сооружений и основания, сочетающих математическое моделирование и статистическую обработку натурных и экспериментальных данных. Показано, что более точный учет требований безопасности при построении диспетчерского графика Саяно-Шушенского водохранилища достигается за счет перехода от установленных для некоторых лет из многолетнего ряда ограничений по уровням наполнения водохранилища к показателям установленных динамических критериев безопасности. Таковым показателем является размер радиального перемещения гребня 33 секции плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Было выдвинуто предположение о том, что размер перемещения гребня плотины за расчетный интервал времени в различные периоды календарного года может зависеть как от статического напора, так и от изменения напора за расчетный временной интервал. Предположение было проверено на основе анализа данных о радиальных перемещениях гребня 33 секции плотины Саяно-Шушенской ГЭС за 2001-2016 гг. Разработана расчетная модель радиальных перемещений гребня плотины, в которой в качестве исходных данных использовались только показатели водохозяйственных расчетов, что удобно для оперативного планирования безопасных режимов работы гидроузла. Приведено описание модели радиальных перемещений гребня 33 секции плотины в зависимости от напора и изменения напора за расчетный интервал времени. Разработана компьютерная программа и выполнен расчет перемещений гребня плотины за 2001-2016 гг. (360 расчетных интервалов). Дана оценка точности полученных результатов. Показано, что модель позволяет получить перемещения гребня плотины для любого расчетного режима работы водохранилища и для различных наблюдавшихся гидрологических условий. Рекомендовано использование модели для построения диспетчерских графиков при разработке правил использования водных ресурсов Саяно-Шушенского водохранилища на реке Енисей.

ABSTRACT

Evaluation of the operational reliability of such important structures as the arch-gravity dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station should be based primarily on the research of stress-strain state of buildings and grounds, combining mathematical modeling and statistical processing of field and experimental data. A more accurate account of safety requirements in the construction of the dispatching schedule can be achieved by moving from the set for a certain set of years of a number of restrictions on the levels of filling of the reservoir

directly to the indicators of the established dynamic safety criteria. Such an indicator is the size of the radial displacement of the crest of the dam section 33 of the reservoir Sayano-Shushenskaya HPP. It is shown that such a calculation model of radial displacements of the ridge of the Sayano-Shushenskaya HPP dam is necessary, in which only the indicators obtained by water management calculations were used as initial ones. It has been suggested that the size of the dam crest movement over the calculated time interval in different periods of the calendar year may depend both on the static head and on the change in head over the calculated time interval. This assumption was checked on the basis of the analysis of radial displacements of the crest section 33 of the Sayano-Shushensky hydroelectric complex over the years 2001...2016, the model describes the radial displacement of the crest 33 of the section of the dam of Sayano-Shushenskaya HPP, depending on the pressure and change of pressure for the calculated time interval. According to the proposed algorithm, a computer program was developed, and the calculation of the displacement of the crest of the dam Sayano-Shushenskaya HPP for 2001...2016 years (360 intervals). The estimation of accuracy of the received results is given. It is proposed to use the developed model for the construction of dispatching schedules in the development of rules for the use of water resources of the Sayano-Shushensky reservoir on the Yenisei river. The developed model uses only indicators of water management calculations as initial data, which is convenient for operational planning of safe operating modes of Sayano-Shushensky hydroelectric power station.

Содержание

| | | |
|----|-------------------------|----|
| 1. | Введение | 61 |
| 2. | Методика | 63 |
| 3. | Результаты и обсуждение | 65 |
| 4. | Заключение | 68 |
| 5. | Благодарности | 68 |

1. Введение

На рубеже 2015-2016 гг. освоение технических гидроэнергетических ресурсов Российской Федерации составляет немногим более 10%, и выполняется гидроэнергетическим комплексом, в состав которого входит немногим более 100 гидроэлектростанций (ГЭС) [1, 2]. Реализация намеченных на ближайшие десятилетия гидроэнергетических проектов связана главным образом с надежным электроснабжением новых промышленных кластеров Восточной Сибири и Дальнего Востока при сохранении устойчивой и безопасной работы флагманов отечественной гидроэнергетики на Енисее и Ангаре. Существенная роль в решении этих задач сохраняется за крупнейшей в стране Саяно-Шушенской ГЭС и ее арочно-гравитационной плотиной, надежность работы которых в современных условиях крайне важна и не должна вызывать никаких сомнений [3, 4].

Оценка эксплуатационной надежности ответственных бетонных сооружений таких, как плотина Саяно-Шушенской ГЭС, в первую очередь основывается на исследованиях напряженно-деформированного состояния сооружений и основания, сочетающих математическое моделирование и статистическую обработку натурных и экспериментальных данных [5–8]. Одновременно, сочетание амплитуд циклических колебаний уровня воды в водохранилище и амплитуд годовых температур порождают многообразие неустановившихся процессов в системе "плотина - основание", которые изменяют напряженно-деформированное состояние всего комплекса сооружений Саяно-Шушенского гидроузла [9].

Поэтому вопрос о необходимости разработки режимов работы Саяно-Шушенского водохранилища, которые учитывают напряженно-деформированное состояние плотины, был поставлен руководством ПАО «РусГидро» после аварии 17 августа 2009 года. Такой режим должен был обеспечить сохранность отремонтированных зон в теле и основании плотины при соблюдении ограничений предельных отметок наполнения водохранилища. Существовавшие на тот момент ограничения, установленные комиссией экспертов в 2001 г., не имели расчетного обоснования.

Целью исследований является более точный учет требований безопасности при построении диспетчерского графика Саяно-Шушенского водохранилища. Достижение поставленной цели возможно путем решения следующих задач: обоснование и разработка расчетной модели радиальных перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС, в которой в качестве исходных использовались бы только показатели, полученные водохозяйственными расчетами; оценка преимуществ предлагаемой модели в сравнении с существующими подходами моделирования и определение возможностей ее использования для проверки условий безопасной работы плотины.

К разработке новых ограничений, которые были названы «динамическими критериями безопасности», одновременно приступили два института: ОАО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева» и АО «Ленгидропроект». Работы были сфокусированы на известный факт, когда перемещение гребня плотины отличается от значения, обусловленного гидростатическим давлением: зимой превышение, а летом - понижение. Разность

между перемещением фактическим и рассчитанным по гидростатическому давлению была названа «температурной составляющей перемещения гребня плотины».

Во ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева для учета температурной составляющей была разработана регрессионная модель, связывающая перемещения плотины и углы поворота горизонтальных сечений плотины с уровнями воды в верхнем бьефе и температурами бетона в базовых точках [9]. Авторами были построены линии критических ($H_{кр}$) и рекомендуемых ($H_{рек}$) уровней воды по фактическим данным 2000-2012 гг. Огибающие критических уровней (рис. 1) использовались при разработке и расчетном обосновании (на многолетнем ряду гидрологических данных) диспетчерских графиков проекта «Правил использования водных ресурсов Саяно-Шушенского и Майнского водохранилищ» (далее – ПИВР) в 2013-2014 гг.

Специалистами АО «Ленгидропроект» [10, 11, 12] было предложено устанавливать ограничения на предельные отметки наполнения Саяно-Шушенского водохранилища в зависимости от температурных условий (рис. 2). Были выделены три типа лет: «теплый», «средний», «холодный» и установлены критерии, характеризующие тип конкретного года. Ограничения для «среднего» типа года были определены по фактическим данным 2013 г. Для «теплого» и «холодного» годов использовались показатели соответственно 2007 и 2006 г. Была предложена формула, позволяющая однозначно определить температурную характеристику предстоящего водохозяйственного года по фактическому перемещению и уровню воды в водохранилище, измеренным 28 апреля. В 2016 г. был разработан проект ПИВР, включавший три диспетчерских графика для трех типов лет: «теплого», «среднего» и «холодного».

Кроме того, специалистами параллельно собирались новые данные натуральных наблюдений за температурой бетона арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС и температурой воды в водохранилище для описания всего спектра воздействий на температурное состояние первого столба плотины [13].

Как в случае критериев безопасности, предложенных ОАО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева», так и для критериев, разработанных АО «Ленгидропроект», при разработке ПИВР возникла проблема - эти критерии могли быть определены только при наличии данных наблюдений за состоянием плотины. Для первой модели ряд критериальных значений был ограничен 12 годами (2000-2012 гг.). Для второй модели температурная характеристика была определена для 27 лет (1989-2015 гг.).

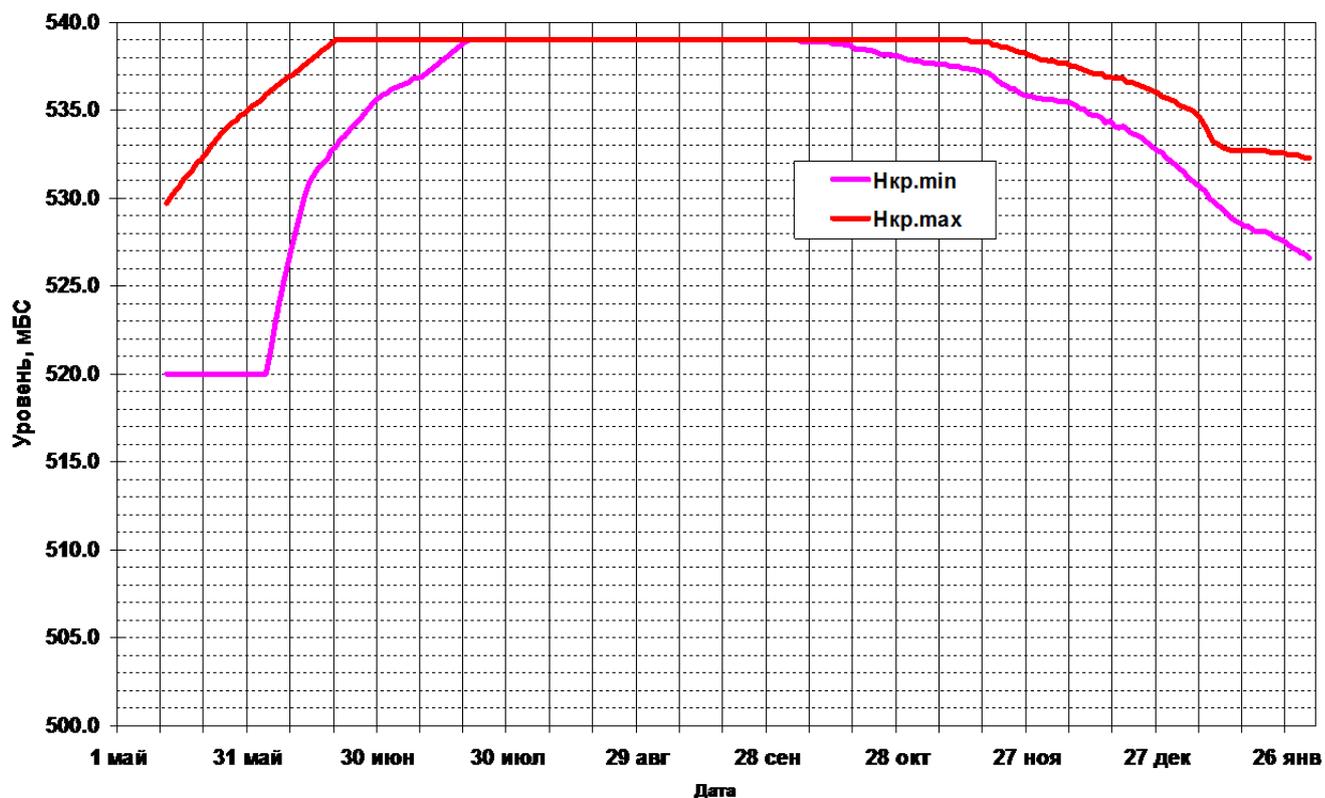


Рисунок 1. Огибающие максимальных и минимальных критических уровней воды в Саяно-Шушенском водохранилище

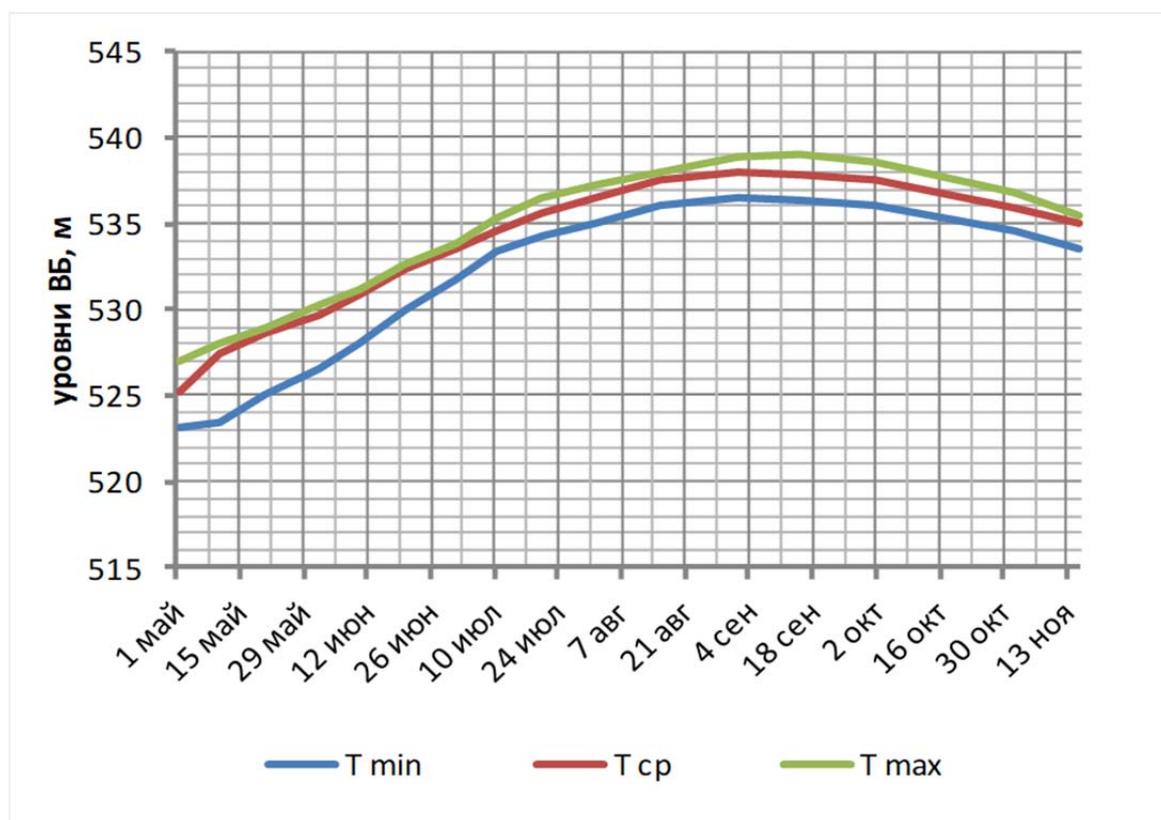


Рисунок 2. Предельные значения уровней верхнего бьефа Саяно-Шушенского гидроузла в зависимости от температурных условий года

2. Методика

Согласно Водного кодекса России работаводохранилищ осуществляется в соответствии с правиламииспользованияводохранилищ, разработанными на основании соответствующих нормативно-методических документов [14–17]. Пункт 4 приложения №2 к «Методическим указаниям по разработке правил использования водохранилищ» [18] требует проведения обосновывающих водохозяйственных и водноэнергетических расчетов по многолетнему гидрологическому ряду [19]. При разработке проекта ПИВР Саяно-Шушенского и Майнского водохранилищ использовался 113-летний гидрологический ряд (1903/04-2015/16 гг.), что потребовало изыскивать способыучетауказанных критериев безопасности для всех расчетных лет.

Более точный учет требований безопасности при построении диспетчерского графика может быть достигнут за счет перехода от установленных для некоторого набора лет из многолетнего ряда ограничений по уровням наполнения водохранилища непосредственно к показателям установленных динамических критериев безопасности. Таковым показателем является размер радиального перемещения гребня плотины секции 33 водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС. Необходима такаярасчетная модельрадиальных перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС, в которой в качестве исходныхиспользовались толькопоказатели, полученные водохозяйственными расчетами. Былопредположение о том, чторазмер перемещения гребня плотины U за расчетный интервал времени в различные периоды календарного годаможет зависеть как от статического напора H , так и от изменениянапора за расчетный временной интервал dH .

Для проверки этого предположения был выполнен анализ данных о радиальных перемещениях гребня секции 33плотины Саяно-Шушенского гидроузла за 2001-2016 гг. В период с мая по октябрь рассматривались значения перемещения и напора на конец декады, а с ноября по апрель - на конец месяца, что соответствовало длительности расчетных интервалов, принятых в водохозяйственных расчетах при разработке проектов ПИВР. Отдельно анализировались связи между перемещением и напором $U=f(H)$ и связи между изменением этих же показателей за интервал регулирования $dU=f(dH)$.

Было установлено, что в период с 01 февраля по 21 мая связь между напором и перемещением лучше описывается зависимостью вида $dU=f(dH)$, с 01 июля по 01 января –зависимостью $U=f(H)$. В период с 01 июня по 21 июня выбор вида связи зависит от водности года. Для каждого интервала регулирования были построены эмпирические зависимости (полиномы 3 степени).

По итогам анализа был разработан следующий алгоритм расчета перемещений секции 33 плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Так для периода с 01.02 по 21.05 перемещение рассчитывается по формуле:

$$U = U_0 + dU(dH), \quad (1)$$

где U_0 – перемещение на начало интервала, $dU(dH)$ – эмпирическая связь между изменением перемещения за интервал и изменением напора.

С 01.06 формула для расчета перемещения выбирается в зависимости от водности года:

при объеме годового стока $W \geq 48.0 \text{ км}^3$:

$$U = \max \left\{ \begin{array}{l} U_0 + dU(dH) \\ U(H) \end{array} \right. \quad (2)$$

при объеме годового стока $W < 48.0 \text{ км}^3$:

$$U = \min \left\{ \begin{array}{l} U_0 + dU(dH) \\ U(H) \end{array} \right. \quad (3)$$

Расчет по формулам (2) и (3) выполняется последовательно для каждого интервала до 01.07. Однако, если в рассматриваемый период произошел переход на зависимость перемещения от напора $U(H)$, то для расчетов до 01.01 используется только этот тип зависимости.

Если до 01.07 такого перехода не произошло, то на 01.07 выполняется дополнительная оценка:

$$U = \max \left\{ \begin{array}{l} U_0 + dU(dH) \\ U_0 + U(H) - U(H)_0 \end{array} \right. \quad (4)$$

Если условию (4) соответствует значение $U_0 + U(H) - U(H)_0$, то до 01.12 расчет ведется по последней зависимости. С 01.02 перемещение вычисляется по формуле (1).

Особый порядок расчета установлен для экстремально маловодных и многоводных лет.

Для маловодных лет с объемом стока $W < 36.0 \text{ км}^3$ при расчете перемещения на 11.07 вводятся поправки:

$$\begin{aligned} \Delta &= -9 \text{ мм при } W < 35.0 \text{ км}^3 \\ \Delta &= +9 \text{ мм} \cdot (W - 36) \text{ при } 35.0 \text{ км}^3 \leq W < 36.0 \text{ км}^3 \end{aligned} \quad (5)$$

и перемещение вычисляется по формуле:

$$U = U(H) + \Delta. \quad (6)$$

Далее расчеты ведутся по формуле $U = U_0 + U(H) - U(H)_0$ до 01.12 и по зависимости $U = U(H)$ до 01.01.

Для многоводных лет, имеющих объем годового стока в диапазоне $61.0 \text{ км}^3 \leq W \leq 65.0 \text{ км}^3$, перемещение на 01.06 определяется как $U = U(H) + 5 \text{ мм}$; с 11.06 по 01.10 $U = U_0 + U(H) - U(H)_0$; с 11.10 по 01.01 $U = U(H)$.

Для многоводных лет с объемом годового стока $W > 65.0 \text{ км}^3$ расчет выполняется по формулам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1. Формулы для расчета перемещений гребня секции 33 плотины в годы с $W > 65.0 \text{ км}^3$

| № п/п | Период расчета | Формула |
|-------|------------------|-------------------------------|
| 1 | с 01.05 по 01.07 | $U = U_0 + dU(dH) + 1$ |
| 2 | 11.07 | $U = U_0 + U(H) - U(H)_0 + 8$ |
| 3 | с 21.07 по 11.10 | $U = U_0 + U(H) - U(H)_0 - 1$ |
| 4 | с 21.10 по 01.12 | $U = U_0 + U(H) - U(H)_0$ |
| 5 | 01.01 | $U = U(H)$ |
| 6 | 01.02 | $U = U_0 + dU(dH)$ |

3. Результаты и обсуждение

В соответствии с изложенным алгоритмом была разработана компьютерная программа и выполнен расчет перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС за 2001/02-2015/16 годы (15 расчетных лет, 360 интервалов). Исходными данными для определения напора H на конец каждого расчетного интервала времени и приращения напора dH за каждый интервал являлись фактические уровни воды в верхнем и нижнем бьефах гидроузла. Расчет велся по декадам в период с мая по октябрь и по месяцам в период с ноября по апрель. В качестве начального условия было задано значение фактического перемещения гребня плотины секции 33 гидроузла, измеренное 01.05.2001 г.

По результатам расчетов была выполнена оценка точности работы модели: для каждого расчетного интервала рассчитаны границы отклонения расчетного перемещения от фактического и вычислены их среднеквадратические значения σ (табл. 2). Данные в табл. 2 характеризуют максимальные ошибки работы модели на определенные даты календарного года. За референтный период максимальная разность между фактическим и расчетным перемещением составила от +10.17 мм (на 11.06.2003 г.) до -7.40 мм (на 11.09.2009 г.). Критерий R^2 составил 0.98 (при $R^2 > 0.7$ результаты моделирования считаются хорошими).

Таблица 2. Предельные ($\pm\Delta$) и среднеквадратические (σ) отклонения расчетных перемещений на конец интервала от фактических значений.

| Дата | - Δ , мм | + Δ , мм | σ , мм |
|-------|-----------------|-----------------|---------------|
| 01.05 | -2.98 | 5.63 | 2.37 |
| 11.05 | -5.39 | 5.56 | 2.52 |
| 21.05 | -5.47 | 5.66 | 2.92 |
| 01.06 | -5.53 | 9.11 | 3.36 |
| 11.06 | -3.40 | 8.69 | 3.75 |
| 21.06 | -5.66 | 5.65 | 3.19 |
| 01.07 | -3.88 | 5.41 | 2.42 |
| 11.07 | -3.86 | 10.17 | 4.42 |
| 21.07 | -4.83 | 4.89 | 3.28 |
| 01.08 | -5.00 | 8.97 | 3.99 |
| 11.08 | -7.07 | 5.57 | 3.43 |
| 21.08 | -4.85 | 4.83 | 2.92 |
| 01.09 | -5.76 | 4.26 | 3.32 |
| 11.09 | -7.41 | 2.82 | 3.60 |
| 21.09 | -5.52 | 3.91 | 2.80 |
| 01.10 | -4.96 | 3.99 | 2.55 |
| 11.10 | -3.72 | 6.12 | 2.53 |
| 21.10 | -6.22 | 3.80 | 2.34 |
| 01.11 | -2.73 | 5.96 | 2.20 |
| 01.12 | -5.29 | 1.49 | 2.86 |
| 01.01 | -3.47 | 3.95 | 2.40 |
| 01.02 | -5.16 | 3.89 | 2.48 |
| 01.03 | -3.88 | 5.12 | 2.29 |
| 01.04 | -3.63 | 6.41 | 2.57 |

О точности модели можно судить, если на график расчетных перемещений наложить линии предельных отклонений $\pm\Delta$ (рис. 3), полученных по данным табл. 2.

Разработанная модель позволяет выполнять оценку безопасности плотины для любых расчетных режимов работы ГЭС. Например, были рассчитаны перемещения гребня плотины Саяно-Шушенского гидроузла в случае регулирования режима работы водохранилища согласно диспетчерским графикам, разработанным в 2013г. по критериям безопасности, предложенным ОАО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева», и в 2016 г. - по критериям безопасности, предложенным АО «Ленгидропроект». В качестве исходных данных использовались напоры, рассчитанные по 113-летнему гидрологическому ряду.

Была выполнена оценка режимов работы гидроузла, полученных по указанным диспетчерским графикам, на предмет не превышения системы предупреждающих критериев [К], разработанной ОАО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева» [9], предупреждающего критерия К1, приведенного в декларации безопасности Саяно-Шушенской ГЭС [20]. Для этого были построены циклограммы, связывающие перемещения и уровни верхнего бьефа, для каждого из диспетчерских графиков (рис. 4 и 5).

На рисунках видно, что циклограммы расчетных показателей не нарушают системы предупреждающих критериев [К], однако если учесть максимальную ошибку в расчете перемещений $+\Delta$, то получаем, что в ряде лет на ветви подъема критерии [К] нарушаются. Это, как правило, происходит в конце первой декады июля, когда ошибка $+\Delta$ максимальна. Критерий К1 не нарушается ни разу.

Важным результатом анализа циклограмм, представленных на рис. 4 и 5, является то, что режим, разработанный в соответствии с предложениями АО «Ленгидропроект», нарушает систему критериев [К] в меньшем числе случаев, хотя позволяет наполнять водохранилище до более высоких отметок, т.е. при использовании указанной системы критериев максимальный уровень не является основным фактором, определяющим безопасные условия эксплуатации плотины.

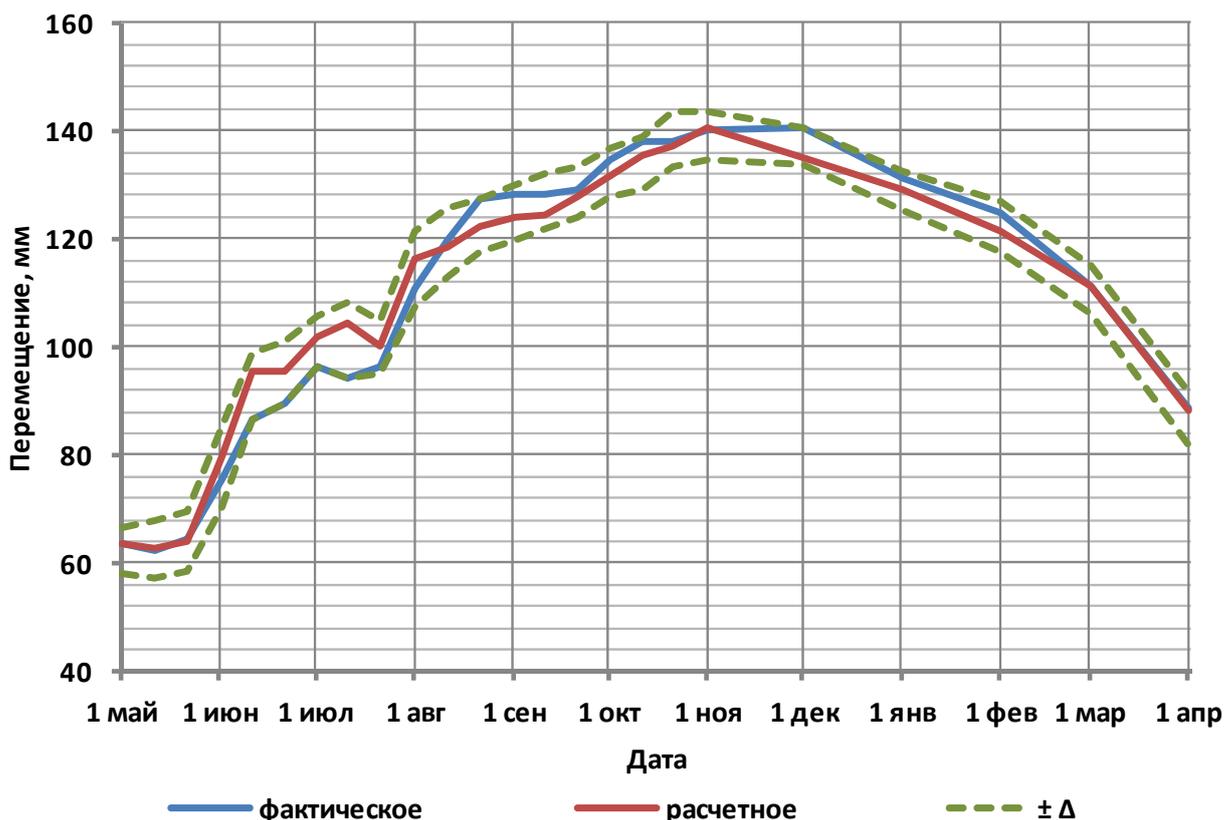


Рисунок 3. Расчетные и фактические перемещения гребня секции 33 плотины Саяно-Шушенского гидроузла

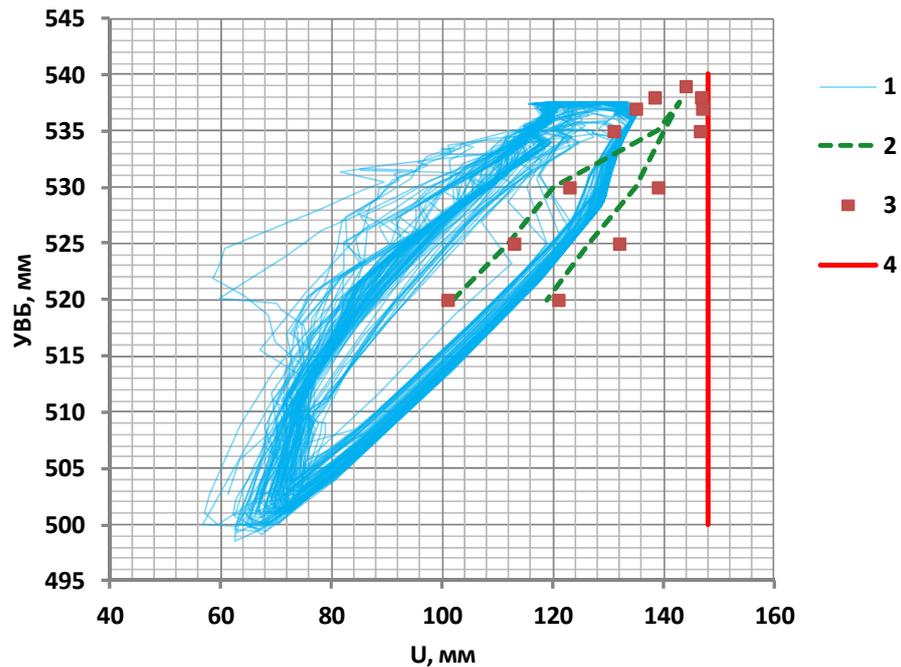


Рисунок 4. Циклограмма радиальных перемещений гребня секции 33 плотины Саяно-Шушенского гидроузла, рассчитанных для варианта регулирования по ограничениям ОАО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева»: 1 – расчетные перемещения; 2 - огибающая расчетных перемещений с учетом максимальной ошибки модели; 3 – система предупреждающих критериев [K]; 4 – предупреждающий критерий K1

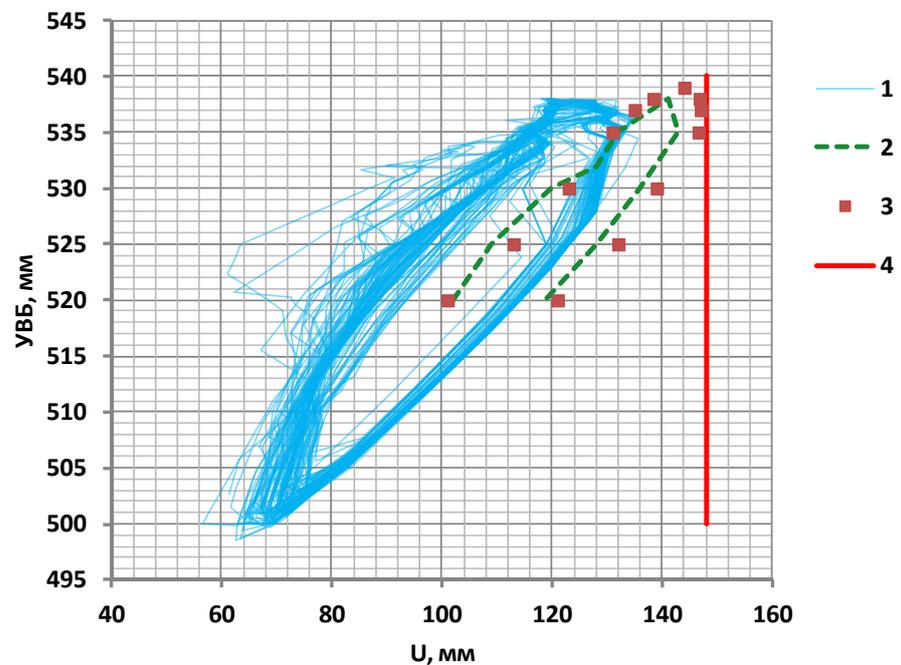


Рисунок 5. Циклограмма радиальных перемещений гребня секции 33 плотины Саяно-Шушенского гидроузла, рассчитанных для варианта регулирования по ограничениям АО «Ленгидропроект»: 1 – расчетные перемещения; 2- огибающая расчетных перемещений с учетом максимальной ошибки модели; 3 – система предупреждающих критериев [K]; 4 – предупреждающий критерий K1.

4. Заключение

1. Обоснована и реализована в виде компьютерной программы модель, вычисляющая радиальные перемещения гребня секции 33 плотины Саяно-Шушенского гидроузла в зависимости от напора и изменения напора за расчетный интервал времени. Расчеты, выполненные за 2001/02-2015/16 гг., показали, что максимальные отклонения фактических перемещений от перемещений, определенных с помощью модели, составляют от +10.17 мм (на 11.06.2003 г.) до -7.40 мм (на 11.09.2009 г.), критерий R^2 равен 0.98, что показывает хорошее совпадение расчетных и измеренных значений.

2. Разработанная модель использует в качестве исходных данных только показатели, которые могут быть получены в ходе водохозяйственных расчетов, поэтому в отличие от других моделей [9, 10], она позволяет получить перемещения гребня плотины для любого расчетного режима работы водохранилища и для любых наблюдававшихся гидрологических условий.

3. На примере системы предупреждающих критериев [К], предложенной ОАО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева», показано, как разработанная модель может использоваться для проверки условий безопасной работы плотины при разработке диспетчерского графика Саяно-Шушенского водохранилища.

4. Использование в модели в качестве исходных данных только показателей простых водохозяйственных расчетов удобно для оперативного планирования безопасных режимов работы Саяно-Шушенского гидроузла.

5. Благодарности

Описанные в статье результаты исследований были получены при поддержке гранта Российского научного фонда (грант №17-77-30006).

Литература

- [1]. Юркевич Б.Н. Гидроэнергетика как составная часть экономического потенциала России // Гидротехническое строительство. 2017. №3.С. 10-13.
- [2]. ГрицанВ.В., Козлов Д.В. Использование водных ресурсов России гидроэлектростанциями различных конструкций // Природообустройство. 2014. №2.С. 43-47.
- [3]. Козлов Д.В., Крутов Д.А. Тенденции обеспечения безопасности на высоконапорных гидроузлах // Природообустройство. 2013. №4. С. 63-67.
- [4]. Фортов В.Е., Федоров М.П., Елистратов В.В. Научно-технические проблемы гидроэнергетики после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС // Вестник Российской академии наук. 2011. Т.81. №7. С. 579-586.
- [5]. Козлов Д.В., Волков В.И., Голышев А.И., Учеваткин А.А. Влияние размеров конечных элементов на расчетное напряженно-деформированное состояние арочной плотины // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. №2.С. 59-63.
- [6]. Кобелева Н.Н., Хорошилов В.С. Построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. №1.С. 214-220.
- [7]. Якубсон В.М. Анализ напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Инженерно-строительный журнал. 2012. Том 27, №1.С. 2-4.
- [8]. Гутов С.С., Ли В.Т. Спутниковая автоматизированная система деформационного мониторинга на Саяно-Шушенской ГЭС. Практический опыт внедрения // Гидротехническое строительство. 2015. №6.С. 17-22.
- [9]. БеллендирЕ.Н., ГордонЛ.А., ХрапковА.А., СкворцоваА.Е. Применение математического моделирования в системах оперативной оценки напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2016. №8. С. 51-55.
- [10]. Вульфвич Н.А., Потехин Л.П. Влияние температурного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС на режимы работы водохранилища // Гидротехническое строительство. 2016. №9.С. 7-16.
- [11]. Вульфвич Н.А., Потехин Л.П. Динамика изменения

References

- [1]. Yurkevich B.N. Gidroenergetika kak sostavnaya chast ekonomicheskogo potentsiala Rossii [Hydropower as an integral part of Russia's economic potential]. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 2017. No. 3. Pp. 10-13.
- [2]. GritsanV.V., Kozlov D.V. Ispolzovaniye vodnykh resursov Rossii gidroelektrostantsiyami razlichnykh konstruksiy [The use of Russia's water resources by hydroelectric power stations of various designs]. Prirodoobustroystvo. 2014. No. 2. Pp. 43-47. (rus)
- [3]. Kozlov D.V., Krutov D.A. Tendentsii obespecheniya bezopasnosti na vysokonapornykh gidrouzlakh [Trends in ensuring security at high-pressure waterworks]. Prirodoobustroystvo. 2013. No4. Pp. 63-67. (rus)
- [4]. Fortov V.Ye., Fedorov M.P., Yelistratov V.V. Nauchno-tekhicheskiye problemy gidroenergetiki posle avarii na Sayano-Shushenskoy GES [Scientific and technical problems of hydropower after the accident at the Sayano-Shushenskaya HPP]. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. 2011. Vol.81. No. 7. Pp. 579-586.
- [5]. Kozlov D.V., Volkov V.I., Golyshv A.I., Uchevatkin A.A. Vliyaniye razmerov konechnykh elementov na raschetnoye napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye arochnoy plotiny [Influence of the size of finite elements on the calculated stress-strain state of an arch dam]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy. 2016. No. 2. Pp. 59-63.
- [6]. Kobleva N.N., Khoroshilov V.S. Postroyeniye prognoznoy matematicheskoy modeli protsessa peremeshcheniy plotiny Sayano-Shushenskoy GES [Construction of a predictive mathematical model of the process of displacements of the Sayano-Shushenskaya hydropower dam]. Interekspo Geo-Sibir. 2015. No. 1. Pp. 214-220.
- [7]. Yakubson V.M. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya plotiny Sayano-Shushenskoy GES [Analysis of the stress-strain state of the Sayano-Shushenskaya hydropower dam]. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. 2012. Vol. 27, No. 1. Pp. 2-4.
- [8]. Gutov S.S., Li V.T. Sputnikovaya avtomatizirovannaya sistema deformatsionnogo monitoringa na Sayano-Shushenskoy GES [Satellite automated deformation monitoring system at Sayano-Shushenskaya HPP].

- необратимых перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС в период эксплуатации при проектных параметрах нагружения (1990-2016 гг.) // Гидротехническое строительство. 2017. №8. С. 2-9.
- [12]. Вульфвич Н.А., Потехин Л.П. Об ограничениях интенсивности наполнения и опорожнения водохранилища бетонных плотин (на примере арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС) // Гидротехническое строительство. 2017. №12. С. 11-19.
- [13]. Александров Ю.Н. Температурный режим первого столба плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных наблюдений // Гидротехническое строительство. 2016. №2. С. 2-9.
- [14]. Водный кодекс Российской Федерации. Текст с последними изменениями и дополнениями на 2016 год. Серия: Актуальное законодательство. М.: 2017.
- [15]. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Опыт составления «Основных положений правил использования водных ресурсов водохранилищ» // Гидротехническое строительство. 1981. №4. С. 54-59.
- [16]. Козлов Д.В., Раткович Л.Д. Использование и состояние водных ресурсов в условиях современного развития водохозяйственного комплекса Российской Федерации // Деловая слава России. 2008. №1(19). С. 20-26.
- [17]. Маркин В.Н., Раткович Л.Д., Глазунова И.В. Особенности методологии комплексного водопользования. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 140 с.
- [18]. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ, утвержденные приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 26.01.2011 №17.
- [19]. Asarin A.E. Estimation of the design flood in the design of Russian dams // International Journal on Hydropower and Dams. 2007. T.14. vol.3. pp. 82-84.
- [20]. Декларация безопасности комплекса гидротехнических сооружений «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного». Филиал ОАО «РусГидро» - «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного» № 14-14(05)0137-00-ГЭС, утверждена 16.09.2014 г.
- Prakticheskiy opyt vnedreniya. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 2015. No. 6. Pp. 17-22.
- [9]. Bellendir E.N., Gordon L.A., Khrapkov A.A., Skvortsova A.Ye. Primeneniye matematicheskogo modelirovaniya v sistemakh operativnoy otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya archno-gravitatsionnoy plotiny Sayano-Shushenskoy GES. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 2016. No. 8. Pp. 51-55.
- [10]. Vulfovich N.A., Potekhin L.P. Vliyaniye temperaturnogo sostoyaniya plotiny Sayano-Shushenskoy GES na rezhimy raboty vodokhranilishcha. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 2016. No. 9. Pp. 7-16.
- [11]. Vulfovich N.A., Potekhin L.P. Dinamika izmeneniya neobratimyykh peremeshcheniy plotiny Sayano-Shushenskoy GES v period ekspluatatsii pri proyektnykh parametrah nagruzheniya (1990-2016 gg.) Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 2017. No. 8. Pp. 2-9.
- [12]. Vulfovich N.A., Potekhin L.P. Ob ogranicheniyakh intensivnosti napolneniya i oporozhneniya vodokhranilishcha betonnykh plotin (na primere archno-gravitatsionnoy plotiny Sayano-Shushenskoy GES). Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 2017. No. 12. Pp. 11-19.
- [13]. Aleksandrov Yu.N. Temperaturnyy rezhim pervogo stolba plotiny Sayano-Shushenskoy GES po dannym naturnykh nablyudeniyy. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 2016. No. 2. Pp. 2-9.
- [14]. Vodnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii. Tekst s poslednimi izmeneniyami i dopolneniyami na 2016 god. Seriya: Aktualnoye zakonodatelstvo. M.: 2017.
- [15]. Asarin A.Ye., Bestuzheva K.N. Opyt sostavleniya «Osnovnykh polozheniy pravil ispolzovaniya vodnykh resursov vodokhranilishch». Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 1981. No. 4. Pp. 54-59.
- [16]. Kozlov D.V., Ratkovich L.D. Ispolzovaniye i sostoyaniye vodnykh resursov v usloviyakh sovremennogo razvitiya vodokhozyaystvennogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii // Delovaya slava Rossii. 2008. No. 1(19). Pp. 20-26.
- [17]. Markin V.N., Ratkovich L.D., Glazunova I.V. Osobennosti metodologii kompleksnogo vodopolzovaniya. M.: Izd-vo RGAU-MSKhA, 2016. 140 p.
- [18]. Metodicheskiye ukazaniya po razrabotke pravil ispolzovaniya vodokhranilishch, utverzhdenyye prikazom Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 26.01.2011 No. 17.
- [19]. Asarin A.E. Estimation of the design flood in the design of Russian dams. International Journal on Hydropower and Dams. 2007. T.14. vol.3. pp. 82-84.
- [20]. Deklaratsiya bezopasnosti kompleksa gidrotekhnicheskikh sooruzheniy «Sayano-Shushenskaya GES imeni P.S. Neporozhnogo». Filial OAO «RusGidro» - «Sayano-Shushenskaya GES imeni P.S. Neporozhnogo» № 14-14(05)0137-00-GES, utverzhdena 16.09.2014 g.

Контактная информация

- +7(495)6519598, sebed@vodinfo.ru (Беднарук Сергей Евстафьевич, начальник Информационно-аналитического центра регистра и кадастра)
- +7(495)6519598, 4yk@xn--vdfn-jyee.xn--u-etb (Чуканов Виталий Викторович, к.т.н., заместитель начальника центра)
- +7(495)6519598, klenov.em@xn--gmil-63d.com (Кленов Евгений Михайлович, аспирант)
- * +7(985)4813569, kozlovdv@mail.ru (Козлов Дмитрий Вячеславович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой)

Contact information

- +7(495)6519598, sebed@vodinfo.ru (Sergey Bednaruk, Head of the Information and Analytical Center of Registry and Cadastre)
- +7(495)6519598, 4yk@xn--vdfn-jyee.xn--u-etb (Vitaliy Chukanov, Ph.D., Deputy Head of the Center)
- +7(495)6519598, klenov.em@xn--gmil-63d.com (Evgeniy Klenov, Student)
- * +7(985)4813569, kozlovdv@mail.ru (Dmitry Kozlov, Ph.D., Professor, Head of Department)

© Беднарук С.Е., Чуканов В.В., Кленов Е.М., Козлов Д.В., 2018